嫦娥四号低频射电频谱仪降低背景噪声方法研究

张 韬[1, 2, 3]，苏 彦[1, 2, 3]

(1．中国科学院大学，北京 100049；2. 中国科学院国家天文台，北京 100101;

3. 中国科学院月球与深空探测重点实验室，北京 100101；)

摘要：嫦娥四号着陆器将搭载低频射电频谱仪在月球背面进行低频射电天文观测。该低频射电频谱仪的观测波段为 0.1MHz~40MHz。根据着陆器在中国空间技术研究院的微波暗室进行的电磁兼容性（Electromagnetic Compatibility，简称 EMC）试验结果，着陆器平台在该频段内自身存在非常强的噪声，其强度甚至淹没掉大部分来自太阳爆发的信号，难以探测有效信号，实现预期的科学目标探测。本文通过模拟仿真分析谱减法，自适应滤波以及维纳滤波这三种方法对着陆器噪声消除的效果，从而选择更为有效的噪声消除方法，为低频射电频谱仪在轨探测任务的数据处理提供依据。

关键词：低频射电频谱仪；嫦娥四号；谱减法；维纳滤波；自适应滤波

中图分类号：P161

0 引 言

美国的著名工程师卡尔·央斯基在 1930 年用他自己建造的“旋转木马”首次观测到了来自银河系的射电辐射[1]，自此展开了对射电天文的广泛研究。经过天文学家的研究发现，不同的天体因为辐射机制的不同会产生不同波段的电磁辐射。因此，对宇宙进行全波段观测是一件非常有意义的事。但是，地球大气的存在使得很多射电波段的信号特别是频率低于 10MHz 的甚低频波段难以穿透到地面。然而，低频波段的探测对于研究天体的演化与起源有着至关重要的作用。为了弥补甚低频波段的观测空白，国际上许多国家或组织发射过卫星到

*基金项目：国家天文台（总部）台级调控基金(Y734061V01)资助.

收稿日期：******； 修订日期：********

作者简介：张韬，男，硕士，研究方向：天文技术与方法。Email:zhangtao@nao.cas.cn

空间进行观测，比如 WIND 和 Ulysses。

由于地球以及众多在轨卫星的电磁干扰，空间低频射电观测也面临挑战。因为月球自身可以遮挡来自地球方向的射电干扰，所以月球背面的射电宁静区是十分理想的观测地点。欧航局（ESA）于 2015 年 1 月提出了在 2025 年对月球背面发射一颗载有低频射电频谱仪的着陆器的 FARSIDE 计划[2]。我国提出嫦娥四号探月计划。嫦娥四号是世界首颗在月球背面软着陆和巡视探测的航天器。2018 年 5 月 21 日，嫦娥四号中继星“鹊桥”成功发射，着陆器和巡视器将于年底发射，该着陆器上搭载了一台科学载荷低频射电频谱仪，是人类在月球背面首次实现对宇宙和太阳的低频段（0.1MHz~40MHz）进行观测。

根据着陆器整器在微波暗室的 EMC 试验结果，虽然来自外界的信号干扰可以被很好的屏蔽掉，但是着陆器本身搭载的电子设备以及其它的载荷对低频观测存在电磁干扰，由于无法对平台进行工程上的调整，所以只能通过数据处理的方式来消除平台的干扰。目前在语音信号以及雷达信号处理等方面，降低信号的噪声处理主要有三种方法：谱减法、自适应滤波和维纳滤波方法。本文将结合低频射电频谱仪的科学目标，对比分析信号增强效果，得到最优化的方法，为低频射电频谱仪在轨探测任务的数据处理提供依据。

1 低频射电频谱仪的工作原理以及噪声来源

低频射电频谱仪系统由四根接收天线（三根 5m 长的长天线 A、B、C，一根 20cm 长的短天线 D)，前置放大器以及电子学单元组成。三根长天线 A、B、C 是相互垂直的[3-4]（如下图 1 所示），接收空间的电磁信号的三个方向上的分量，根据电磁的传播理论就可以计算出接收的信号的强度以及方向。短天线 D 与长天线 B、C 处于同一个平面，根据电磁波的传播理论以及不同长度的天线的增益的不同，A、B、C 长天线可以同时接收到来自宇宙空

间的远场信号和来自着陆器本身的近场信号，而短天线 D 因天线短且离着陆器近，因此收到主要是来自近场的着陆器噪声信号[3]。

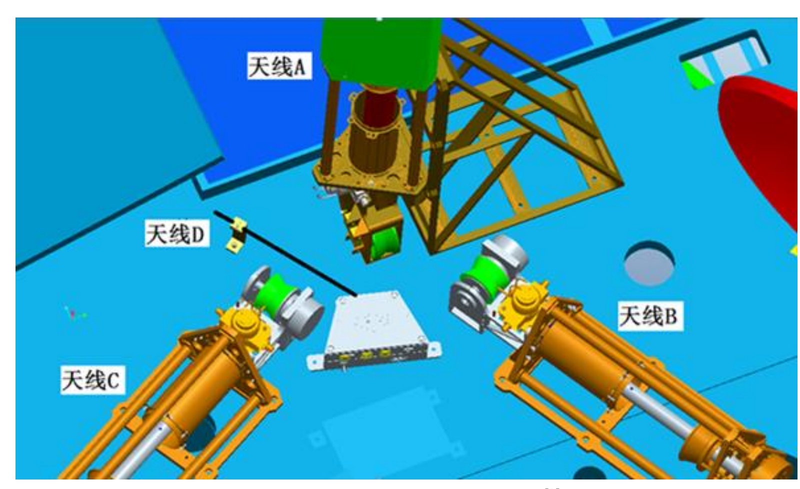


图 1 低频射电频谱仪四根天线[3]

Fig.1 The four antennas of the very low frequency radio spectrometer[3]

嫦娥四号上搭载的低频射电频谱仪的工作频率包括低频(100KHz~2MHz)和高频(1MHz~40MHz)两个频段，频谱仪的主要技术参数如下表 1 所示，

表 1 低频射电频谱仪主要技术参数[3]

Tab.1 Main technical parameters of Very low frequency radio spectrometer[3]

项目	设计参数	实测结果
工作频率	100KHz~40MHz	100KHz~40MHz
接收机灵敏度(nV/$\sqrt{Hz}$)	6	8.1
频率分辨率	低频：5KHz	4.88 KHz
	高频：100KHz	97.66 KHz
最大数据率(bps)	4.5M	4.34M
功耗(W)	24	24

在低频射电频谱仪工作的同时，着陆器上其他部分载荷以及一些电子模块也同时处于运行状态，比如电源控制器、数传调制器、发射段 RE102、数传控制 SMU 等。下图 2 给出了

月球表面的电磁波通量密度，而天线附近区域的电场强度和接收机输出的电压值可以根据下面公式计算得出：

$$U_{out} = \frac{G_{preamp}\ G_{Receiver}\ IL_{coax}}{1+Z_{\alpha}/Z_{preamp}} * \overrightarrow{h_e}\,\overrightarrow{E} \quad (1)$$

式中，U_{out} 为接收机的输出电压值，G_{preamp} 和 $G_{Receiver}$ 分别是前置放大器增益和接收机增益，IL_{coax} 为高频电缆插损，Z_{α} 和 Z_{preamp} 分别是天线阻抗和前置放大器阻抗，$\overrightarrow{h_e}$ 为天线有效长度，$\overrightarrow{E}$ 则是天线处的电场强度。

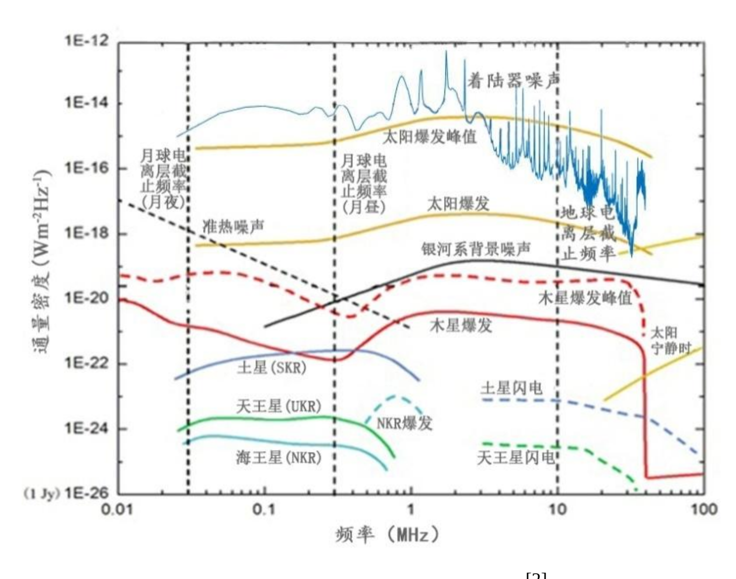


图 2 月球表面的电磁波通量密度[2]

Fig.2Radio emission levels on the surface of moon[2]

公式（1）中的各项参数可以根据低频射电频谱仪生产方提供的定标报告获取，结合各项参数以及公式（1）可以将接收机测得电压数据反演出空间电场以及通量密度。图 2 中给出了各天体到达月球表面的通量密度，图中的着陆器噪声是根据在中国空间技术研究院的微波暗室当中对嫦娥四号着陆器整器进行的 EMC 试验中测得工况三（着陆器电源控制器主份、数管管理单元主份、数传调制器主份、载荷电控箱主份、低频射电频谱仪等依次加电连续工作）天线 A 接收到的高频段数据反演得到。从图中可以发现着陆器的噪声通量密度大于普通的太阳爆发产生的通量密度，与太阳爆发峰值通量密度相当。所以不对接收到信号进行降噪处理，我们难以反演出太阳爆发的真实强度。

2 低频射电频谱仪有效信号提取方法

由于低频射电频谱仪的三根主要天线 A、B、C 收到的目标信号里都会包含有来自着陆器自身的噪声信号的干扰，所以在对信号进行提取使用之前需要通过降噪算法来抑制噪声并最大限度的分离出有用的信号。用 x(n)表示观测到信号，s(n)表示有用信号，v(n)表示噪声信号。它们中间的关系可以表示为：

$$x(n)=s(n)+v(n) \tag{2}$$

在本文的模拟仿真中，将一组强度与太阳爆发强度接近的模拟信号作为有用信号 s(n)，用 EMC 试验测得的工况三的着陆器噪声当作噪声信号 v(n)，通过自适应滤波，谱减法以及维纳滤波的方法来进行仿真处理。

2. 1 谱减法

谱减法是信号增强的一个常见方法，其原理是在频域上用信号加噪声的幅值减去噪声的幅值得到有用信号的幅值。S.F.Boll 于 1979 年改进了该方法，称为改进的谱减法[5]。改进的谱减法在谱减的过程中使用的是噪声的平均功率，可以有效得减小剩余的“音乐噪声”。改进谱减法可以用公式表示为

$$|S(n)|^{\gamma}=\begin{cases}|\mathrm{X(n)}|^{\gamma}-a*D(n); & |\mathrm{X(n)}|^{\gamma}\geq a*D(n)\\ b*D(n); & |\mathrm{X(n)}|^{\gamma}<a*D(n)\end{cases} \tag{3}$$

其中 D(n)为噪声的平均幅值，

$$\mathrm{D(n)}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|D_i(n)|^{\gamma} \tag{4}$$

公式（3)、（4）中 γ 等于 1 或 2，为 1 时就是幅值相减，γ 为 2 时就是功率相减。a（a≥1）为过减因子, b(b>0)是补偿因子，可以通过调节两个参数来减少周期性的误差。结合低频射电频谱仪的结构特点以及对科学数据的要求，可以用长天线 A、B、C 收到信号的幅值的平

均值减去短天线 D 收到信号的幅值的平均值来获取信号的幅值。

由于在设计上天线 A、B、C 与天线 D 的长度以及材质不一样导致其增益也不相同，所以在进行谱减的时候需要补充不同增益带来的信号强度差异。具体来说，先取一小段时间内的信号计算出它们的对消系数。然后在后续的处理过程中将 D 天线收到信号的平均幅值乘以对消系数来获取噪声幅值。可以结合低频射电频谱仪的结构特点来运用改进的谱减法进行降噪处理，以天线 A 和天线 D 为例可以用公式表示为

$$|S(f)| = \begin{cases} |V_A(f)| - |P(f) * V_D(f)|; & |V_A(f)| \geq |P(f) * V_D(f)| \\ b * |P(f) * V_D(f)|; & |V_A(f)| < |P(f) * V_D(f)| \end{cases} \quad (5)$$

其中 $V_A(f)$是长天线 A 收到的信号进行傅里叶变换后在相应频点的平均值，$V_D(f)$则是短天线 D 收到的信号在相应频点的平均值，γ 取 1。P(f)通过取太阳宁静时的一小段时间内四个接收机接收到的信号分别算出的，

$$P_A(f) = \frac{V_A(f)}{V_D(f)} \quad (6)$$

处理流程如图 3 所示。

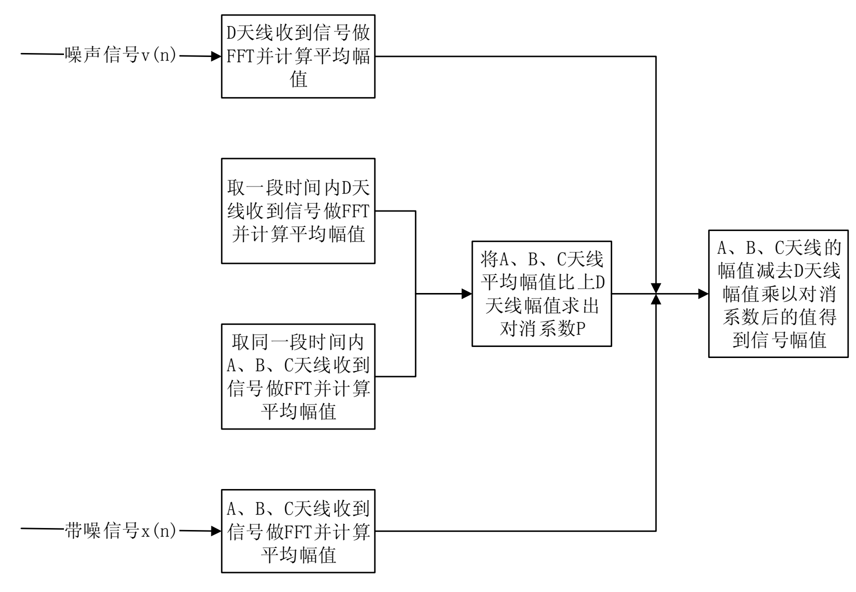


图 3 改进谱减法运算示意图

Fig.3Improved spectral subtraction diagram

下面三种数据处理方法以天线 A 与天线 D 数据进行仿真为例，谱减法仿真结果如图 4

所示；

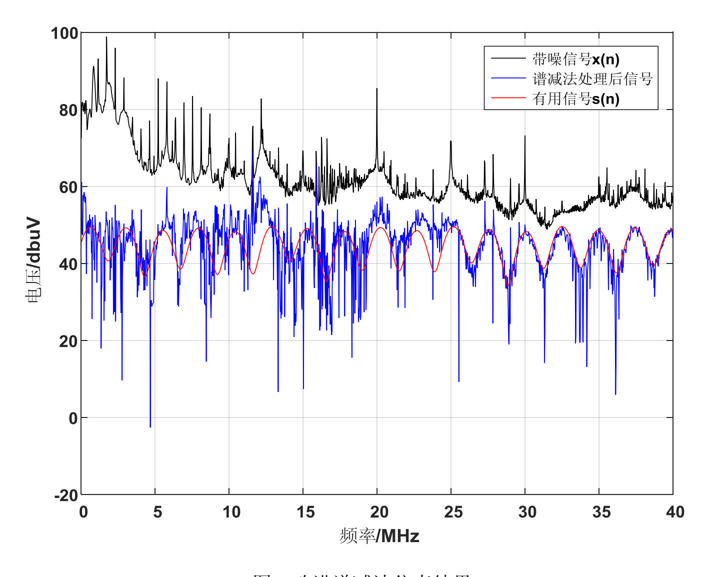


图 4 改进谱减法仿真结果

Fig.4Simulation results by improved spectral subtraction

图 4 中展示的是 FFT 后的频域信号，横轴表示频率（单位为 MHz），纵轴为幅度（单位为 dBuV）。图 4 中黑色的曲线是带有噪声的信号，蓝色的曲线是经过改进谱减法处理后的信号，红色的曲线是有用信号。从图 4 中可以看出该方法在整个波段对噪声都有有效的抑制，在 10MHz 以下的频段内噪声的幅度下降了 20dB 左右，在其它频段也能将噪声降低 10dB 左右，且处理后的信号波形基本能还原原本的有用信号，在背景噪声较低的频段（20MHz~40MHz）处理效果更好。

2.2 维纳滤波

从公式（2）中可知，我们进行信号处理的目标是得到不含噪声的有用信号 s(n)。但是在实际的信号处理过程中，我们求得的有用信号并不完全等于 s(n)，只能是 s(n)的逼近值或估计值，因此对信号的处理可以看作是对 s(n)的估计，处理信号就是找到一个最佳的估计器。维纳滤波就是一个寻找最佳估计器来估计信号的方法[6-7]。

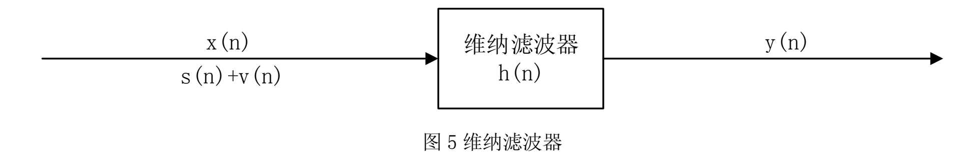


图 5 维纳滤波器

Fig.5Wiener filter

图 5 为维纳滤波的原理示意图，其中 h(n)是维纳滤波器的滤波参数，y(n)是对有用信号 s(n)的估计值。用公式可以表示为

$$y(n) = x(n) * h(n) \tag{7}$$

根据最小误差准则（LMS）使$\varepsilon = E[\{s(n) - y(n)\}^2]$达到最小就可以算出最佳滤波参数，

$$h(n) = \frac{E[s(n) * x(n)]}{E[x^2(n)]} \tag{8}$$

将上式取傅里叶变换可以导出，

$$H(k) = \frac{P_{sx}(k)}{P_x(k)} \tag{9}$$

其中 $P_{sx}(k)$为 s(n)与 x(n)的互功率谱密度，$P_x(k)$为 x(n)的功率谱密度。由于有用信号 s(n)与噪声信号 v(n)互不相关，即有 $P_{sv}(k)=0$,则可以得到

$$P_{sx}(k) = P_s(k) \tag{10}$$

$$P_x(k) = P_s(k) + P_d(k) \tag{11}$$

将式（10）和式（11）带入式（9）中可以得到式（12）

$$H(k) = 1 - \frac{1}{\gamma(k)} \tag{12}$$

公式(12)中，$\gamma(k)$为傅里叶变换以后对应频点处带噪信号的功率谱与噪声功率谱的比值[8]。根据天线 D 和天线 A 接收到数据可以计算出$\gamma(k)$，从而计算出最佳的滤波参数。下面图 6 为仿真结果。

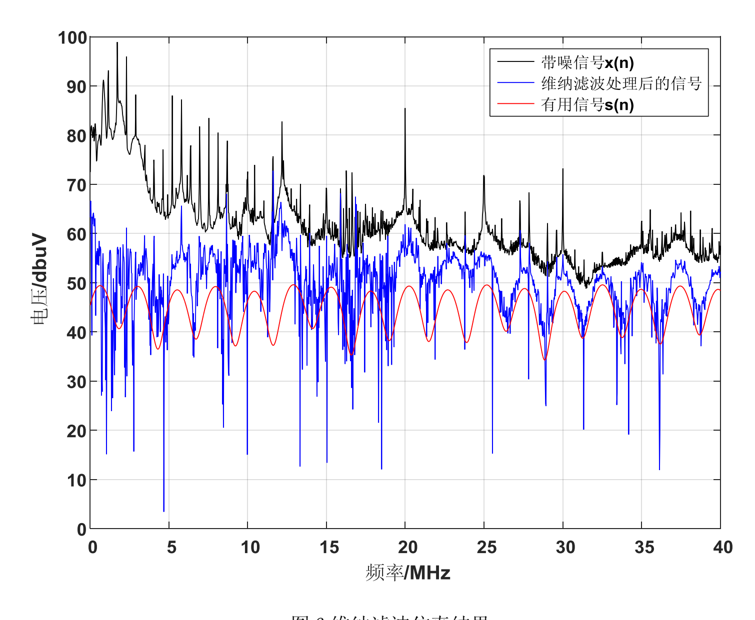


图 6 维纳滤波仿真结果

Fig.6Simulation results byWiener filter

从图 6 中可以看出维纳滤波也可以降低噪声的影响，但是相对于谱减法的降噪效果要差一些。基本也能还原原有用信号的波形，但是处理后的信号在背景噪声比较大的波段（0~20MHz）仍难以分辨出有用信号。

2.3 自适应滤波降噪

不同于维纳滤波，自适应滤波器可以根据收到信号不断地自动的调节自身的参数来最大限度的降低噪声信号[9]。自适应滤波已经广泛运用在系统识别、信道均衡、信号增强以及信号预测方面。本文中主要运用的是它的信号增强的功能，它的结构示意图如下图 7 所示。自适应滤波算法至少需要两套接收设备，其中一套用来接收带有噪声的信号，一套专门用来接收噪声，然后通过自适应算法求得有用信号，而低频射电频谱仪正好有这两套接收设备。

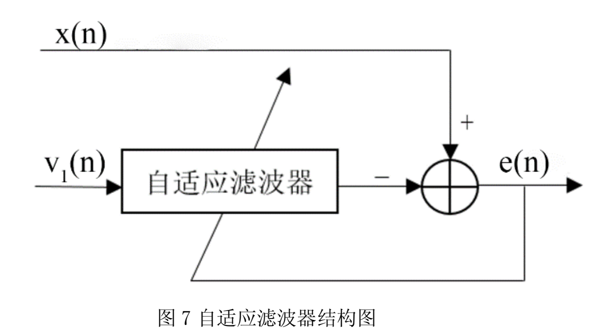


图 7 自适应滤波器结构图

Fig.7Structure of the adaptive e filter

如上图 7 所示为一个自适应降噪滤波器的结构示意图，其中 x(n)是指接收机收到信号（其中包括有用的信号 s(n)以及噪声信号 v(n)），而 v_1(n)则是指另一个接收机接收到的噪声信号, e(n)表示误差信号。它们之间的关系可以表示为

$$e(n) = x(n) - \sum_{i=1}^{N}[w(i)v_1(n-i)] \quad (13)$$

式(13)中 w(n)表示的是滤波器的加权系数，该系数可以通过最小均方误差准则(LMS)或者最小二乘法（RLS）评估 $E[e^2(n)]$来调整，使滤波器工作在最佳的状态[10-12]。下面利用最小二乘法（RLS）来进行仿真。

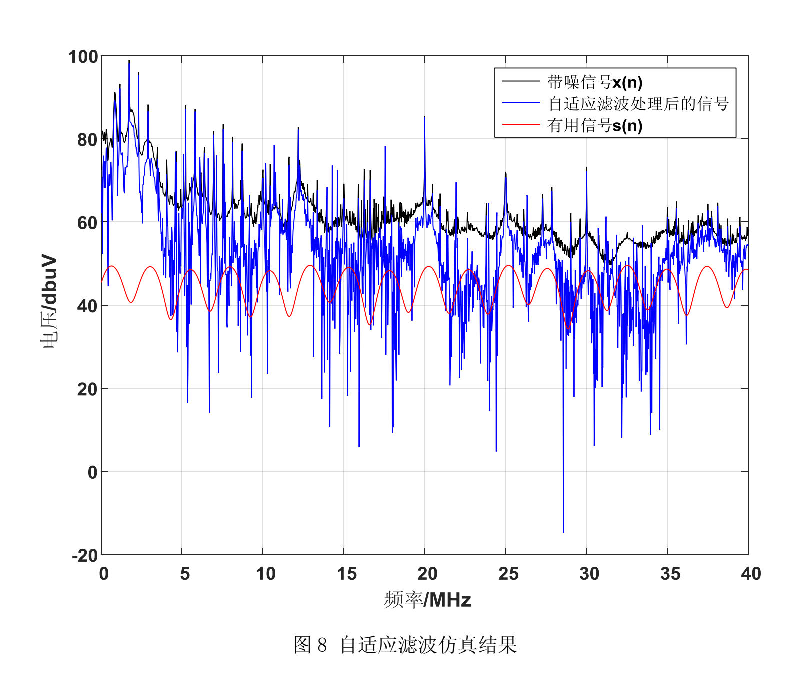


图 8 自适应滤波仿真结果

Fig.8Simulation results byadaptive filter

从图 8 中可以发现利用自适应滤波的方法仿真的结果比较差，降噪效果不明显，对信号的还原度也不高。在噪声信号中一些幅度比较大的频点处（如 1.73MHz、2.32MHz、2.9MHz 等），经过自适应滤波处理后噪声信号幅度没有下降。

3 低频射电频谱仪背景噪声消除结果分析

2.1 到 2.3 已经通过三种不同的数据处理方法对着陆器噪声进行了仿真处理，其中自适

应滤波方法是在时域的处理方法，改进谱减法和维纳滤波则是在频域的处理方法。表 1 给出了这三种信号增强办法对信号信噪比的提升效果的对比。

表 2 三种方法处理数据前后的信噪比

Tab.2 SNR before and after the data processing by three different algorithms

数据处理方法	改进谱减法	维纳滤波	自适应滤波（RLS）
处理前信噪比/dB	-27.64	-27.64	-27.64
处理后信噪比/dB	1.99	-4.64	-25.35
信噪比提升/dB	29.63	23.00	2.29

从表 1 中我们可以发现改进谱减法和维纳滤波的处理结果明显好于自适应滤波，且其中改进谱减法的信噪比提升是略大于维纳滤波的。自适应滤波信号增强系统降噪能力受参考输入端的噪声信号 $v_1(n)$与带噪信号中的噪声信号的相关度有很大的影响。在低频射电频谱仪设计的时候用于接收信号的长天线 A、B、C 与用于接收着陆器噪声信号的短天线 D 的各项参数不同，以及仿真的信号中有用信号的信噪比非常的低等因素导致了自适应滤波降噪的效果变差。长天线 A、B、C 与短天线 D 的参数不同导致 D 天线与长天线收到噪声信号的不同可以在频域上通过评估短天线与长天线在不同频点处的增益差异来抵消，所以在频域处理的两种算法在降噪时能取得比较好的效果。

为了验证低频射电频谱仪的性能以及数据处理方法，我们在中国科学院国家天文台密云观测站食堂楼顶安装好低频射电频谱仪以及接收天线进行了外场试验，并且在距离接收天线 100 米左右的宿舍楼里用任意波形发生器连接天线发射模拟信号。而着陆器噪声信号是采用的 EMC 试验工况三的试验结果，由一个放在接收天线下方的 1 米长的小天线连接波形发生器发出。下图 9 为其中一组试验天线 A 接收到的数据在利用改进的谱减法处理后的结果，其中发射的有用信号为 1.8MHz 的点频信号。

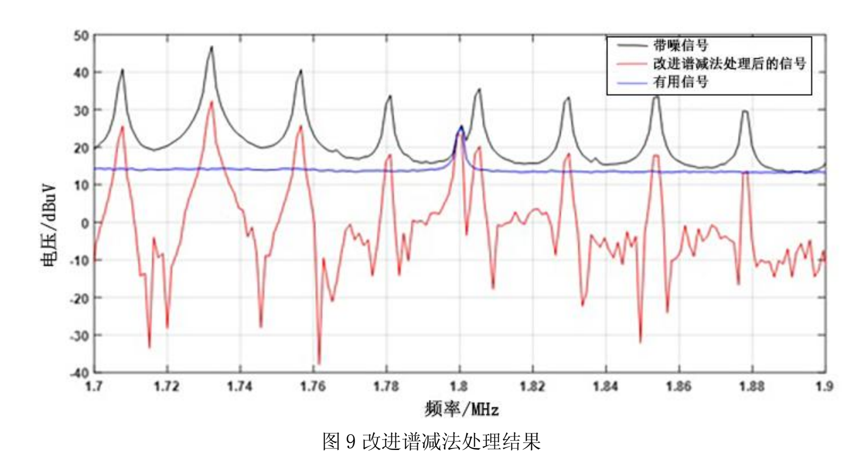


图 9 改进谱减法处理结果

Fig.9Noise reductionby improved spectral subtraction

图 9 中截取了 1.7MHz~1.9MHz 的信号，从图中可以看出经过改进谱减法处理后，着陆器的噪声被有效的抑制了，幅度下降了 10dB，而有用信号的幅度并没有被降低，信噪比也从-25.23dB 提升到了-2.60dB。通过改进谱减法处理后的信号，信噪比提升了-22.63dB，说明改进谱减法在外场实验中对于着陆器背景噪声信号的降低也是有效的。

4 总结

在月球背面进行极低频(0.1～40MHz)探测是非常有科学意义的[13]，同时由于该频段信号微弱信噪比低，所以提取有用信号也是十分困难的。本文利用 EMC 测试的着陆器噪声以及嫦娥四号搭载的低频射电频谱仪对月球背面能接收到的目标信号强度进行了仿真实验。利用改进的谱减法、维纳滤波以及自适应滤波这三种常见的信号增强的算法对仿真信号进行了提取，其中改进的谱减法对信号的提取效果显著，经处理后信噪比有明显的提升，可以直观的从处理后的波形中看见目标信号波形。并且改进的谱减法对在密云进行的外场试验的数据的处理也有很好的效果。因此，可以将改进的谱减法作为低频射电频谱仪主要的预处理方法，实现对太阳爆发进行较为准确的观测。低频射电频谱仪在月球背面进行探测的过程中，温度等环境的变化可以引起对消系数的改变，所以在实际探测过程中需要结合实际环境情况，每

隔一段时间计算一次对消的系数。

参考文献：

[1]Jansky K G. Directional Studies of Atmospherics at High Frequencies[M]// Classics in RadioAstronomy. Springer Netherlands, 1932:10-22.

[2]Mimoun D, Wieczorek M A, Alkalai L, et al. Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the moon[J]. Experimental Astronomy, 2012, 33(2-3):529-585.

[3]纪奕才，赵博，方广有, 等. 在月球背面进行低频射电天文观测的关键技术研究[J]. 深空探测学报，2017, 4(2):150-157.

JI Yicai, ZHAO Bo, FANG Guangyou, et al. Key Technologies of Very Low Frequency Radio Observations on the Lunar Far-Side[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2):150-157.

[4]施硕彪，董亮，高冠男, 等. 米波太阳射电频谱仪的科学目标和技术方案[J]. 天文研究与技术，2011，8(3):229-235.

Shi ShuoBiao, Dong Liang, Gao Guannan, et al. Scientific Objectives and Technical Design of a Meter-Wave Spectrometer for Solar Radio Observation [J]. Astronomical Research and Technology, 2011, 8(3):229-235.

[5]Boll S. Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction[J]. Acoustics Speech & Signal Processing IEEE Transactions on, 1979, 27(2):113-120.

[6]Brown R G, Hwang P Y C. Introduction to random signals and applied Kalman filtering :[M]. John Wiley & Sons, 1997.

[7]Wiener, N. Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series :[M]. John Wiley & Sons, 1949.

[8]宋知用. MATLAB 语音信号分析与合成 [M]. 北京航天航空大学出版社，2017.

SONG ZY. MATLAB speech signal analysis and synthesis [M]. Beihang University Press, 2017.

[9]耿妍，张端金. 自适应滤波算法综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报，2008，6(4):315-320.

GENG Y, ZHANG D J. Survey of adaptive filtering algorithms [J]. Information and Electronic Engineering, 2008, 6(4):

315-320

[10]PauloS.R.Diniz. Adaptive filtering: algorithms and practical implementation [M]. Kluwer Academic Publishers, 2008.

[11]沈福民. 自适应信号处理 [M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2001.

SHEN Fumin. Adaptive Signal processing [M]. Xidian University Press, 2001.

[12]王树棠，王蕴红. 自适应滤波器阶数与稳态均方误差[J]. 电路与系统学报，1997(1):65-67.

Wang Shutang, Wang Yunhong. Study on Order Numberof Adaptive Filter and its Steady State Square Error [J]. Journal of Circuits and Systems, 1997(1):65-67.

[13]梅丽，苏彦，周建锋. 极低频射电天文观测现状与未来发展[J]. 天文研究与技术，2018，15(2):127-149.

Mei Li, Su Yan, Zhou Jianfeng. The History and Development of Low-Frequency Radio Observation [J]. Astronomical Research and Technology, 2018, 15(2):127-149.

Research of The Method forReducing Background of Very Low Frequency Radio Spectrumon Chang’E-4

Zhang Tao[1, 2, 3], Su Yan[1, 2, 3]

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China, Email: zhangtao@nao.cas.cn;

2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Key Laboratory for Exploration in the Moon and deep Space, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101,China)

Abstract： Chang’E-4 will carry a Very Low Frequency Radio Spectrometer(VLFRS), which will land on the far-side of the moon forRadio observation.The VLFRS has an observation frequency of 0.1MHz~40MHz.According to Electromagnetic Compatibility(EMC) test results in the Microwave darkroom of China Academy of Space Technology, the lander platform is quite

noisy in this band, and the intensity of the noise is even stronger than that of most signals from the sun burst. In this pape, we will simulate and optimize background elimination through improved spectral subtraction, adaptive filtering and wiener filtering, and choose a more effective method foreliminating background.

Key word: Very low frequency radio spectrometer;Chang’E-4;Improved spectral subtraction;Wiener filtering;Adaptive filtering